551.326.7:(*666)

with the author's compliments

T. Tabata

Tadashi TABATA 1960 Studies on Mechanical Properties of Sea Ice. V. Measurement of Flexural Strength. *Low Temperature Science, Ser. A, 19.* (With English résumé p. 200)

海氷の力学的性質の研究 V*

―― 曲げ破壊強度の測定 ――

田畑忠司

(低温科学研究所 海洋学部門)

(昭和 35 年 8 月受理)

I. まえがき

沿岸結氷から切り出した海氷の小試料を用いて破壊強度を測定する研究は Butkovich[1], 大浦・木下[2], Assur[3] その他の人々によつて行なわれている。Butkovich は曲げ破壊と管状試料の破壊による方法, 大浦・木下は曲げ破壊と圧縮, Assur は管状試料の破壊による方法を用いている。それらの諸研究の結果, 例えば, 塩分 2‰ ぐらいの海氷の曲げ強度は −5℃ 附近で 10 kg/cm² 程度であることがわかつている。 また海氷の強度は氷中に含まれる塩分量と温度, もしくは海氷中のブラインの体積比(これは塩分量と温度の函数である)に関係あることがわかつた。即ち, 温度が高くて塩分量が多いほど, またはブラインの体積比が大きいほど強度が小さくなる。

海氷は, 特に温度が融解点に近いときには僅かの外力によつても容易に変形をおこす[4]。即ち, 極めて塑性的である。それ故, 海氷の破壊強度は応力の増加速度によつて異なることが期待される。純氷については, Jellinek[5] が応力増加速度と引張り強度との関係を研究して, 応力増加速度を大きくすると強度は次第に減少して 0.5 kg/cm²/sec 以上の応力増加速度のときに破壊強度が一定になることを指摘している。純氷についての Jellinek の研究では応力増加速度が割合に大きい場合の測定数が少ないし, 純氷とは可成り違つた構造をもつている海氷に対して上記の結論がそのままあてはまるか否かもわからない。既に述べた海氷の強度についての諸研究においては, 応力増加速度の大凡の値, もしくはその最低値が記載されているのみで, 応力増加速度と強度との関係については殆んどふれていない。

著者は海氷の曲げ強度と応力増加速度との関係を知るために, 沿岸結氷から切り出した矩形断面の棒に応力を一定の増加速度で与えながら曲げ破壊を起させるという方法で曲げ破壊強度を測定した。一つの試料に対しては応力増加速度は一定であるが, 応力増加速度を広範囲に変えた測定を行ない, 曲げ強度と応力増加速度との関係を知ることができた。これと同時に, 試料に撓み振動をおこさせて, その共振周波数とジメンションから弾性率も求めた。また応力の増加曲線からも弾性率を求め, 曲げ強度とそれらの関係を吟味した。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 572 号

Pam:551.326:(52) TAB

POLAR PAM 2021 POLARPAM

54648

II. 測定方法

曲げ破壊強度の測定に用いた装置はFig. 1に示した。この装置では試料台ABは電動機の回転によつて一定の速さで上昇または下降する。その速さは変速歯車及びプーリーを交換することによつて，1×10^{-4} cm/secから2×10^{-1}cm/secのあいだを変化させることができる。試料台の支点間の距離AB=24 cmで加重支点CとDはABを3等分している。試料台ABを一定の速さで上昇させると試料には一定の速さで曲げが生ずる。曲げの際に試料に加わる力Fはプルービングリング Pのダイヤルケージの針の動きから知ることができる。このリングには別に抵抗線歪計Rを貼付けて，増幅器と電磁オスシログラフを用いて試料に加わつた力の時間的変化を記録させた。装置全体は恒温箱のなかにおさめてあり，所要の温度で測定を行なう。

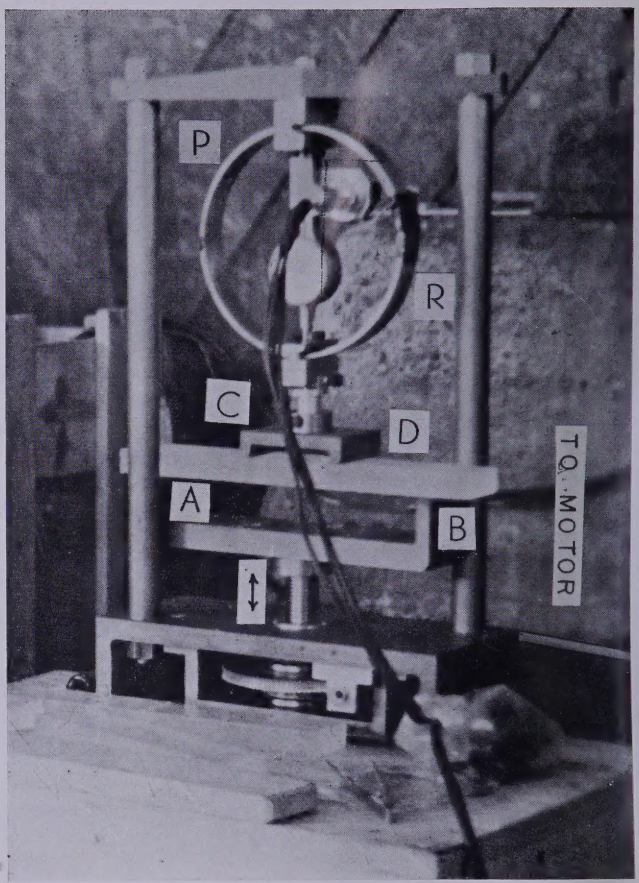

Fig. 1. The flexural strength meter. P: Proving ring, R: Wire strain gauge.

試料は北海道オホーツク海岸の紋別港内・外の沿岸結氷からつくつた。先ず沿岸結氷から40 cm×50 cmくらいの氷塊数個を切り出して，陸上で約1日放置する。これらの氷塊から厚さ約2 cm，幅約5 cm，長さ30～40 cmの角棒をその広い面が結氷の表面に平行になるように切り出す。海氷の構造はその厚さの方向には均一でないので，表面からの距離のちがいによつて試料を区分し，等しい距離にある部分から切り出した試料を集めて一つの組とした。ひとつの組は20～30本の試料から成つており，それらの密度，塩素量，構造がほぼひとしいと見做した。沿岸結氷の厚さは約20 cmであつたので結氷中のいろいろの位置に対応するいくつかの試料の組をつくることができた。

このようにして作つた試料について，はじめにその両端に小鉄片を氷着させて電磁的な方法で撓み振動をおこさせて弾性率[6]を測定した。この測定は試料の長さが38 cm以上ある試料のみについて行なつた。

次に，氷着させた小鉄片をとり除き，Fig. 1に示した装置で曲げ破壊強度を測定した。試料はその広い面のうちの結氷板の表面に近いほうの面を上にして試料台ABに載せた。所要の一定の速さで試料台を上昇させ乍ら，撓み破壊がおこるまでプルービング・リングに加わつた力Fの変化をオスシログラフに記録させた。同じ組に属する試料のうちの3～8本を同じ上昇速度で破壊させ，得られた破壊強度の平均をその組の試料のその上昇速度における破壊強度とした。同じ組の試料を4～5段階の上昇速度で破壊させたので各々の組について上昇速度と破壊強度との関係が得られた。

試料の各稜の長さは強度の測定前にキャリパーで測り，その結果から求めた体積と重量から密度を算出した。塩素量は破壊させた試料の融解水についてモールの銀滴定法で求めた。

海氷の弾性率や破壊強度は温度の函数なので測定はすべて −3°Cの温度で行なつた。試料は測定前2～5時間 −3°Cの恒温箱にをさめてをき，曲げ装置と撓み振動法による弾性率測定用の試料支持台も −3°Cの恒温箱にをさめたままで測定を行なつた。

測定に用いた試料の組は合計11組(A～K)で，このうちA～Hの8組は現地の海岸の漁業協同組合の市場内で行なつた。残りのI～Kの3組の測定は，氷塊を低温科学研究所に運搬して低温実験室内で整形したのち全く同じ条件下で行なつた。

Fig. 1の装置で試料に曲げを生ぜさせると支点CDのあいだでは曲げモーメントは一定になる。最大の引張り応力σは試料の下面のCD間に働き

$$\sigma = F\frac{l}{bh^2} \tag{1}$$

である。Fは試料に加わつた力で，b, h, lはそれぞれ試料の幅と厚さ及び長さでl=24 cmである。試料自身の重量による曲げは無視できるほど小さい。曲げ破壊強度をσ_cとすれば，σ_cは破壊の瞬間の外力F_cと(1)式を用いてを求めることができる。

オスシログラフに記録されるのは力Fの時間的変化であるが，(1)式を利用すると引張り応力σの増加速度を容易に求めることができる。

更に，Fig. 1で力$\frac{F}{2}$がそれぞれ加重支点C及びDに加わつたときのC及びD点の撓み量をδとすると

$$\delta = \frac{5}{324}\frac{Fl^3}{E^*I_z} = \frac{F}{E^*}0.185\frac{l^3}{bh^3} \tag{2}$$

となる。lは支点間の距離=24 cmで，E^*は弾性的に撓んだ場合の弾性率である。E^*が時間に関係なく一定であれば

$$\dot{\delta} = \dot{F}\frac{k}{E^*} \tag{3}$$

となる。プルービング・リングは力 F が加わつたために縮む。したがつて，C及びDにおける試料の撓み量 δ は，試料支持台 AB の上昇量 δ' と力 F によるリングの縮み（即ち，C及びDの上昇量）との差であり

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}' - a\dot{F} \qquad (4)$$

なる関係がある。a はリングに加わつた力とその縮みの関係をあらわす常数で，筆者の使用した容量 100 kg のリングでは $a = 2.91 \times 10^{-3}$ cm/kg であつた。

(3)，(4)式から

$$E^* = \frac{k\dot{F}}{\dot{\delta}' - a\dot{F}} \qquad (5)$$

試料台 AB の上昇速度 $\dot{\delta}'$ はある試料にとつては一定の値であるから，記録された力 F の増加速度 $\dot{F}$ が一定（すなわち記録が直線的であるとき）ならば，(5)式から弾性率 E^* を求めることができる。

記録された力の増加曲線が直線的でない場合には，弾性率 E^* が時間的に変化している。すなわち，試料は塑性的な性質を示していることになる。

III. 測 定 結 果

(a) 撓み振動法による弾性率

破壊強度の測定にさきだつて，試料を両端自由にして水平に支持し，電磁的に撓み振動をさせて共振周波数を測定した。共振周波数は 304～385 サイクル/秒で，試料の長さと厚さはそれぞれ 38.5～40 cm，1.95～2.05 cm であつた。この共振周波数とジメンションから求まる弾性率を振動弾性率とよび E であらわすことにする。

Fig. 2 は振動弾性率 E と試料の密度 ρ の関係を示したものである。明らかに，E は ρ の減

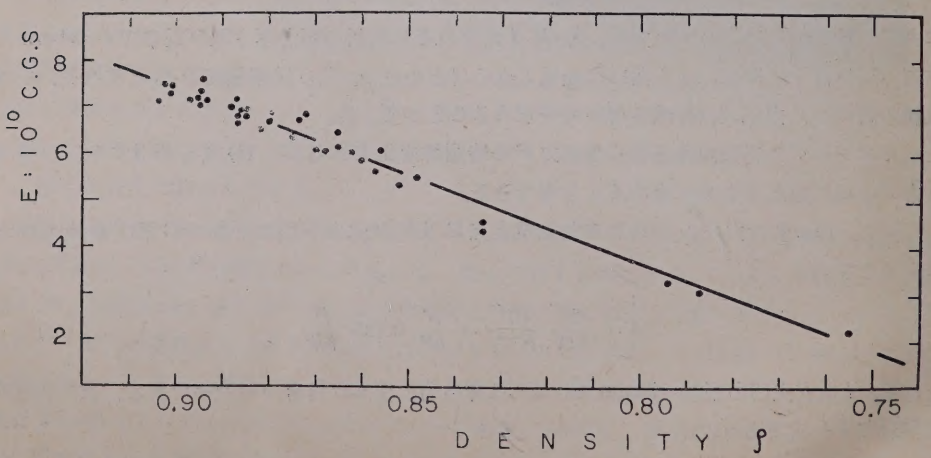

Fig. 2. The relation between Young's modulus E obtained by the lateral vibration method and density ρ at −3°C.

少に伴なつた直線的に減少している。Fig. 2 に示した関係は筆者が既に報告[6] したものと全く相似である。

(b) 加重の時間的変化と破壊の起る位置

オスシログラフに記録された力 F の時間的変化の例を Fig. 3 に示したこの図の上側に示した 3 個の例では力の増加が直線的でなく，試料は塑性変形を起してから破壊していることがわかる。下に示した例では，力は直線的に増加して破壊しており，あたかも弾性体に力を加えて破壊させたときのようである。このように力の時間的な変化が直線的な場合を仮に弾性的に破壊したと見做すと，(5)式を用いて弾性率に相当する E^* を求めることができる。この E^* を曲げ弾性率と名付けることにする。

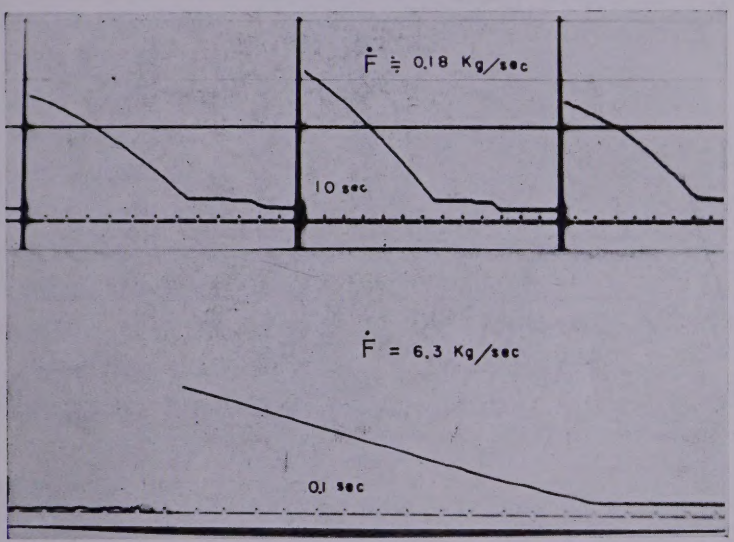

Fig. 3. Some examples of oscillogram.

破壊はほとんど支点 CD のあいだで起つた。破壊のおこつた位置と海氷の短冊状結晶薄片との関係を示したのが Fig. 4 である。図は試料の下面に紙を載せその上から鉛筆で一様にこすつて得た，いわゆる拓本である。黒い平行線は結晶片の切口で，破壊は Anderson[7] が指摘しているように，結晶片の切口に平行に，すなわち，ブライン細胞を連ねる線上に生じていることは明らかである。この線上ではブライン細胞が点在するために単位長さあたりに占める氷の部分の割合が少なく，そのために強度が小さくなつていることは疑いない。Fig. 4 には，破壊線が引張り応力 σ とほぼ 45 度をなす方向に，すなわち，剪断力が最大の方向に生じているものがある。しかも図中の黒い平行線を含む紙面に垂直な面は氷の結晶の基底面にあたつており，亡りを生じ易い。これらのことから破壊は剪断力による亡りのために生じたのではないかとも考えられるが，結論に達するためには更に詳細な研究が必要である。

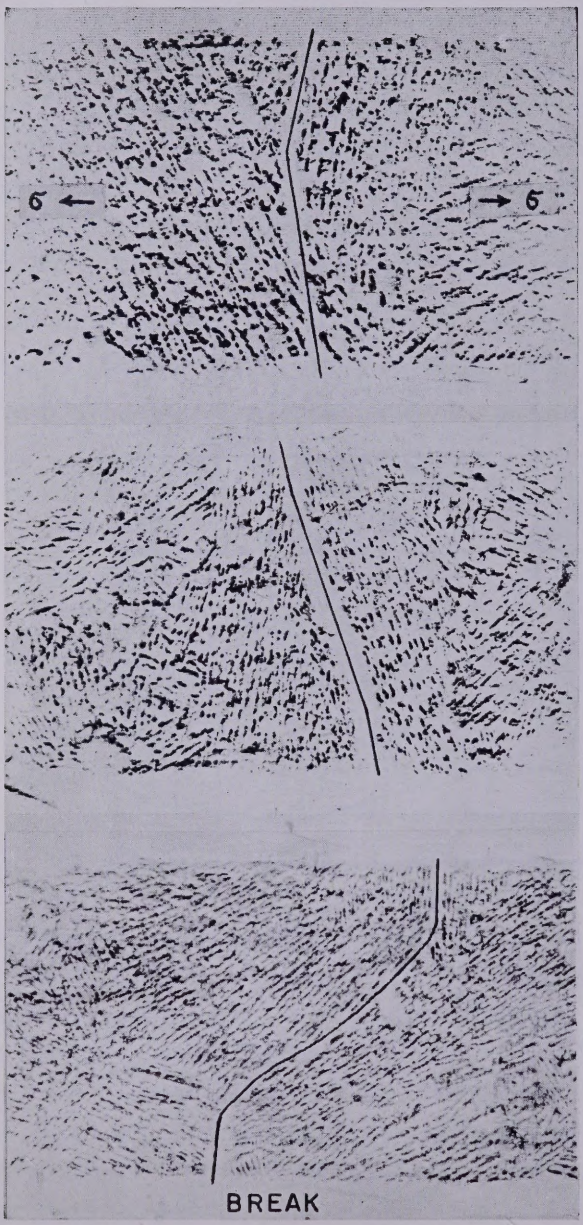

Fig. 4. Pencil rubbings of broken segments of sea ice (×1).

(c) 曲げ破壊強度

破壊に要した力 F_c は 2.8～11.3 kg で，(1)式をもちいて求めた曲げ強度 σ_c は 1.9～14.6 kg/cm² であつた。σ_c は $\dot{F}$ または応力増加速度 $\dot{\sigma}$ および試料の各組によつて異なつていた。

得られた曲げ強度 σ_c と試料の下面の引張り応力の増加速度 $\dot{\sigma}$ との関係を示したのが Fig. 5 (a) である。塑性変形をおこした試料では $\dot{\sigma}$ は時間的に変化しているが，この図ではその平均値を用いた。同じ組の試料から得た測定結果は同じ記号で示してある。一つの点は A～H の組では 3～5 個，I～K では 5～8 個の測定値の平均値を示している。実線は A～H の組の σ_c の平均の傾向を示し，点線は I～K の組のおのおのの σ_c の傾向を示している。

曲げ強度 σ_c は $\dot{\sigma}$ が 2～5 kg/cm²/sec のときに極小値を示しており，$\dot{\sigma}$ がそれより小さくなつても又は大きくなつても σ_c は大きくなつていることがわかる。ある $\dot{\sigma}$ のときに測定された試料のうちで力の増加が直線であつたもの，すなわち，弾性的に破壊したと見做し得る試料の数の百分率を示したのが Fig. 5 (b) である。$\dot{\sigma}$ が 2 kg/cm²/sec のときにはほぼ半数の，4～6 kg/cm²/sec 以上ではすべての試料が弾性的に破壊していることがわかる。小さな $\dot{\sigma}$ のときに測定された A～H の組で弾性的に破壊したと見做し得る試料のみ

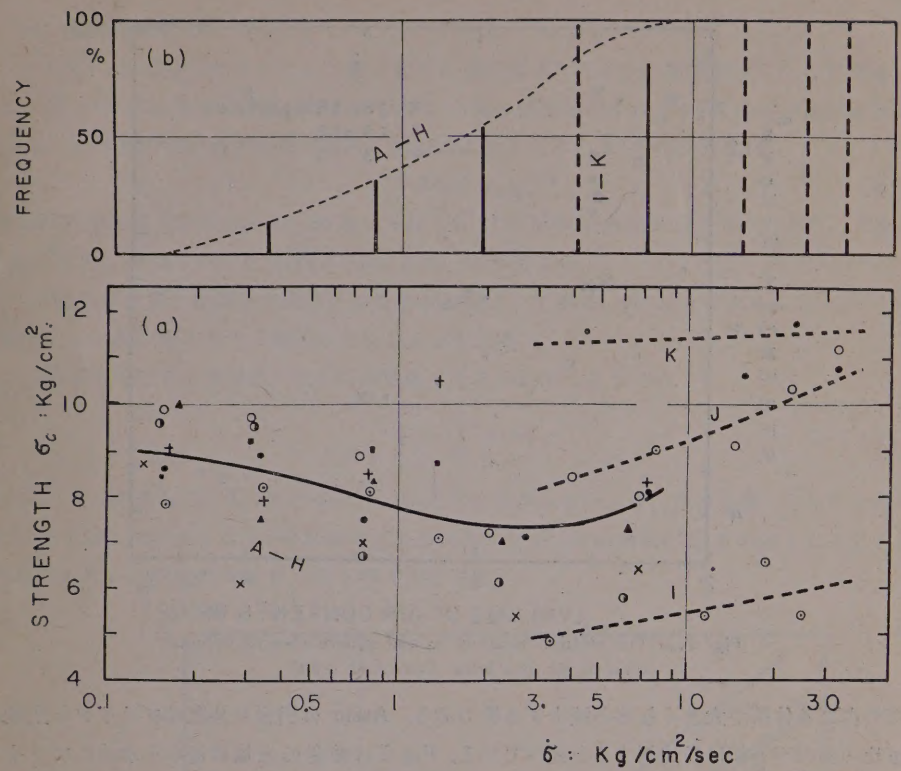

Fig. 5. (a) The relation between the flexural strength σ_c and the increasing rate of stress $\dot{\sigma}$. (b) The relation between $\dot{\sigma}$ and the frequency of elastically broken beams at −3°C.

について曲げ強度 σ_c を求めると Fig. 6 のようになり，σ_c は $\dot{\sigma}$ の変化には関係しないことがわかる。 Figs. 5, 6から，$\dot{\sigma}$ が小さいときに曲げ強度が大きくなるのは塑性変形をおこすためであることは明らかである。 $\dot{\sigma}>3\sim5$ kg/cm^2/sec のときに σ_c が大きくなるのは，のちに述べるように，$\dot{\sigma}$ が大きくなると曲げ弾性率 E^* が大きくなることに関係している。

曲げ強度 σ_c が最大の引張り力を受ける試料の下面における純氷の面積比に関係するとすれば，σ_c は試料中の純氷の体積比が小さくなれば，すなわち，ブラインと

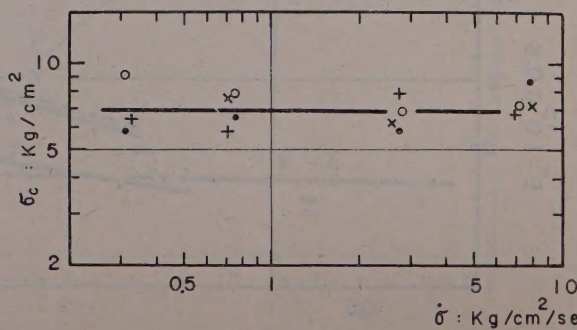

Fig. 6. The flexural strength σ_c obtained from elastically broken beams in A–H group.

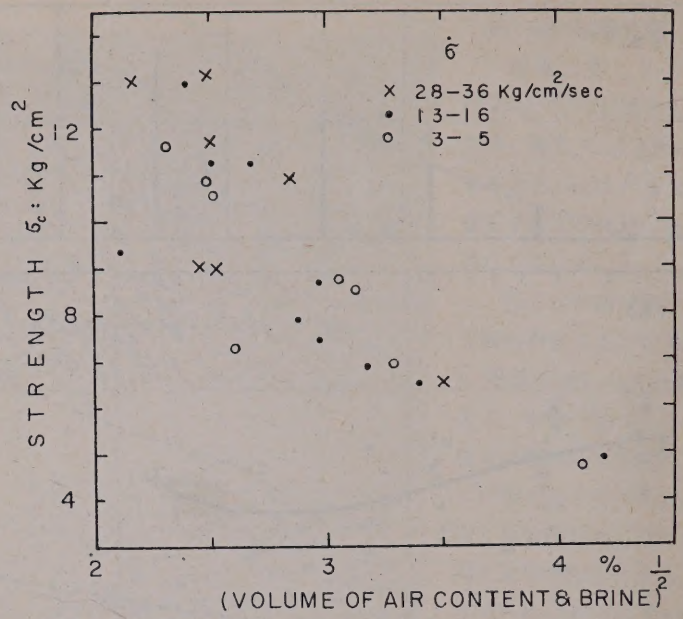

Fig. 7. The relation between σ_c and square root of volume ratio of air and brine content at −3°C.

空隙の占める体積が大きくなると減少する筈である。Assur は引張り強度はブラインと空隙の体積比の和の平方根に逆比例すると述べている。Fig. 7 は強度 σ_c と塩素量から求めたブラインの体積比と密度から算出した空隙の体積比の和の平方根との関係を示したものである。ブラインと空隙の量が多くなれば σ_c が小さくなることは明らかであるが，この両者の関係については更に検討する必要があるとおもわれる。

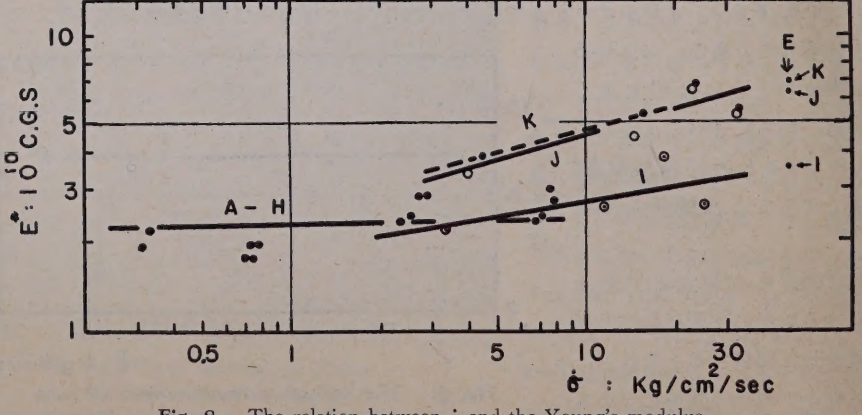

Fig. 8. The relation between $\dot{\sigma}$ and the Young's modulus E^* obtained by the lateral bending at −3°C.

(d) 曲げ弾性率

すでに(b)で述べたようにして求めた曲げ弾性率 E^* と $\dot{\sigma}$ との関係を示したのが Fig. 8 である。図中の点は A～H の組ではそれぞれ 1～3 個の測定値の平均で I～K の組では Fig. 5 (a) と同じく 5～8 個の測定値の平均である。図中の実線から $\dot{\sigma}$ と E^* のあいだには

$$E^* = m\,\dot{\sigma}^n \tag{6}$$

なる関係があることがわかる。m は A～H, I, J 及び K の各組に対してそれぞれ, 2.3, 1.9, 2.4, 2.6 で, n はそれぞれ 0.076, 0.16, 0.29, 0.26 である。

Fig. 8 には撓み振動法で求めた弾性率 E が記入してある。E^* は $\dot{\sigma}$ が大きくなるにつれて増大し乍ら E の値に近づく傾向にあることがわかる。

(6)式を用いると歪速度 $\dot{\varepsilon}$ を $\dot{\sigma}$ の函数としてあらわすことができ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{m}\,\dot{\sigma}^{(1-n)} \tag{7}$$

となる。この式から, A～H の組, いいかえると $\dot{\sigma}$ が小さいときには歪速度 $\dot{\varepsilon}$ は $\dot{\sigma}$ にほぼ比例して増すが, $\dot{\sigma}$ が大きな I～K の組では $\dot{\sigma}$ が大きくなると $\dot{\varepsilon}$ の増加の割合が鈍くなることがわかる。これらの関係は Fig. 9 からも明らかである。

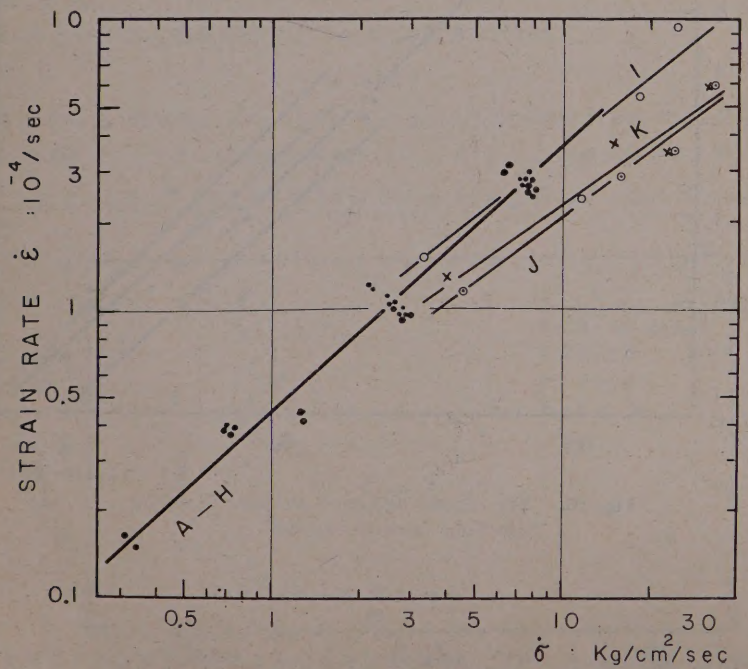

Fig. 9. The relation between $\dot{\sigma}$ and strain rate $\dot{\varepsilon}$.

応力増加速度 $\dot{\sigma}$ を大きくすると力を加え始めてから破壊するまでの時間 T は短かくなる。時間 T はオスシログラフの記録から読取ることができ，$\dot{\sigma}$ と T の関係を示したのが Fig. 10 である。破壊強度 σ_c が一定ならば T は $\dot{\sigma}$ の逆数に比例して減少する筈である。しかしすでに述べたように，特にI及びJの組では σ_c は $\dot{\sigma}$ によつて変化するので，図に示したように，T は $\dot{\sigma}$ の逆数そのものには比例しない。図の実線は

$$T = a\,\dot{\sigma}^{-b} \tag{8}$$

であらわされる。ここで a はA～H, I, JおよびKの組に対してそれぞれ 6.9, 4.5, 7.2, 11.3 で b はそれぞれ 1.0, 0.913, 0.894, 0.994 である。

(7) および (8) 式から，破壊の起つたときの最大歪 ε は

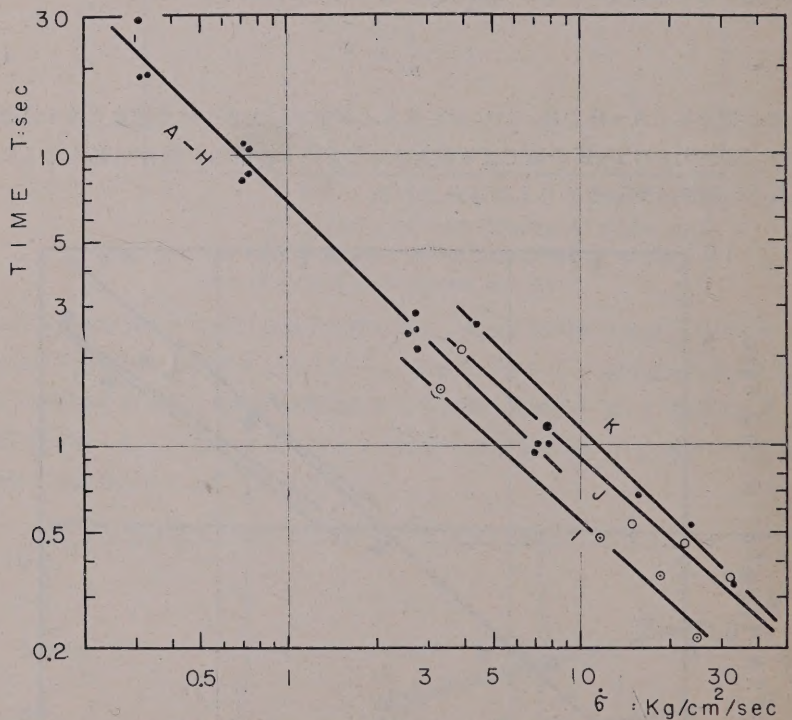

Fig. 10. The relation between $\dot{\sigma}$ and time T during which the force was applied.

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}T = \frac{a}{m}\,\dot{\sigma}^{(1-b-n)} \tag{9}$$

であらわされる。既にのべたように，$b+n>1$ であるから $\dot{\sigma}$ が大きくなると ε が減少することがわかる。

以上のことから，海氷では，応力増加速度 $\dot{\sigma}$ をいろいろに変え乍ら曲げを起させると，$\dot{\sigma}$

が大きくなるにつれて歪速度 $\dot{\varepsilon}$ が大きくなり，破壊の起るときの歪 ε は減少することがわかる。そうして，$\dot{\sigma}$ が小さいときには曲げ弾性率 E^* は $\dot{\sigma}$ に関係しないが $\dot{\sigma}$ が 3～5 kg/cm²/sec 以上になると $\dot{\sigma}$ が大きくなるに伴なつて E^* と曲げ強度 σ_c が大きくなり $\dot{\sigma}$ と $\dot{\varepsilon}$ 及び ε との関係は $\dot{\sigma}$ が小さいときとはいくらか違つてくる。

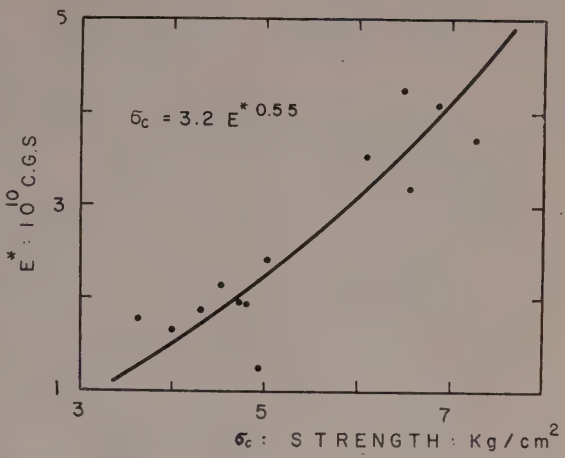

Fig. 11. The relation between σ_c and E^* for group I at −3°C.

ガラスなどでも破壊強度 σ_c と応力増加速度 $\dot{\sigma}$ のあいだには，$\dot{\sigma}$ を大きくすると σ_c が増加し ε は小さくなるという海氷と全く同様の関係が知られている。また一般の物質については，弾性率が大きいと強度が大きくなるということが周知である。

(6), (8) 式と $\sigma_c = \dot{\sigma} T$ の関係を用いて σ_c と E^* の関係を求めると

$$\sigma_c = pE^{*q} \qquad (10)$$

となる。p と q は A～H の組の平均，I, J, K の組に対してそれぞれ 6.9, 0；3.22,0.55；5.22, 0.37；11.1, 0.023 である。A～H の組の平均では σ_c は E^* に殆んど無関係であるが，その他の組では E^* が大きくなると σ_c が大きくなることがわかる。Fig. 11 は I の組における σ_c と E^* の

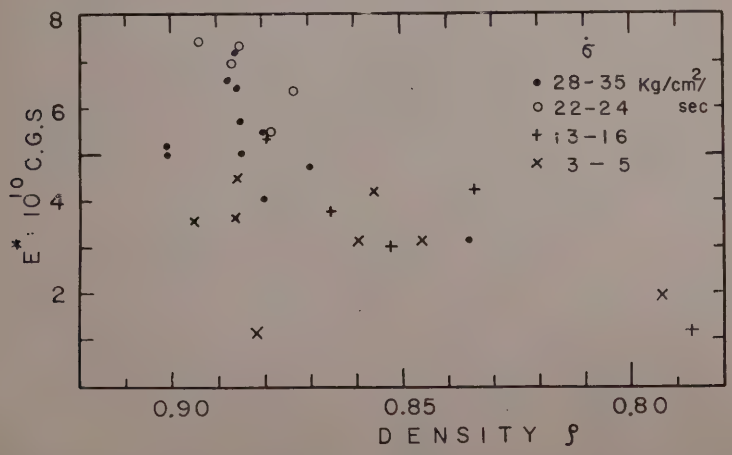

Fig. 12. The relation between E^* and density ρ.

関係を示したものである。

撓み振動法で求めた弾性率 E が密度に比例することは既に述べたが，曲げ弾性率 E^* についても同じ関係が考えられる。Fig. 12 は E^* と密度の関係を示したものである。点はかなりばらついてはいるが，密度が小さくなると E^* も減少する傾向がある。

(e) 結氷板中の破壊強度・弾性率の垂直分布

測定に用いた試料の厚さは約 2 cm でそれらを切りだした結氷板の厚さは約 20 cm であつたので結氷板中のいろいろの深さにおける σ_c や，E 及び E^* の分布を知ることができた。Fig. 13 はその結果を示している。図中には同時に密度，塩素量の分布も示した。結氷の内部においてはこれら諸要素の分布が決して単純でないことがわかる。図に示した強度と弾性率は何れも

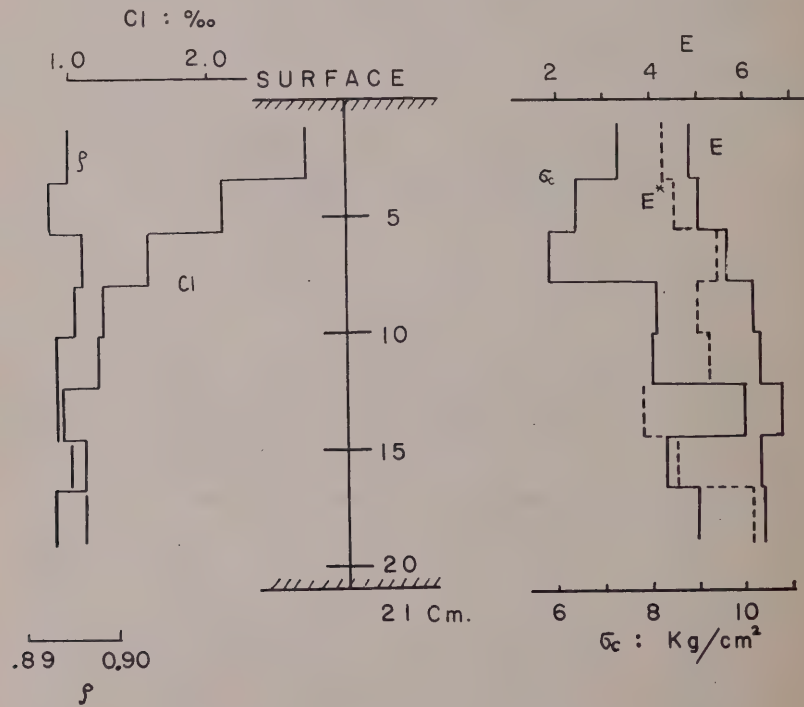

Fig. 13. The vertical distributions of flexural strength σ_c, Young's modulus E & E^*, density ρ and chlorinity in sea ice sheet at −3°C.

−3°C で測定された値である。図に示した諸量は温度によつて変化するし，結氷板中には温度の傾斜があるのが普通である。したがつて実際の氷板中では σ_c, E, E^* などの分布は，生成の条件が異なると氷板の構造，密度，塩素量がかわることと相俟つて極めて複雑な分布を示すことであろう。

IV. 結　　語

沿岸結氷から切り出した海氷の小試料を −3°C で定速度加重法によつて曲げ破壊強度，振

動弾性率，曲げ弾性率を測定した結果について述べた。試料の厚さは約2 cm，幅は約5 cm，曲げの測定の支点間の距離は24 cmで，塩素量は0.80～3.02‰，密度は0.78～0.91であつた。

測定の結果次のようなことがわかつた。

1) 曲げ破壊強度σ_cは1.9～14.6 kg/cm²で，応力増加速度，試料中のブラインと空隙の体積の和，密度等によつて変化する。

2) 応力増加速度$\dot{\sigma}$が0.1～3 kg/cm²/secのときは大部分の試料は塑性的に破壊し，$\dot{\sigma}$が大きくなるにつれてσ_cは減少する。

3) $\dot{\sigma}$>5 kg/cm²/secになるとほとんどすべての試料はあたかも弾性的に破壊し，σ_cは$\dot{\sigma}$が増すと大きくなる。このとき，曲げ弾性率E^*が大きくなり，最大歪εは減少する。

4) $\dot{\sigma}$が大きくなるとE^*は振動法で求めた振動弾性率Eに近づく。

5) E^*が大きくなるとσ_cも大きくなる。

6) EもE^*も共に試料の密度が小さくなると減少する。

測定は海氷の融解点近くで行なつたにも拘わらず，応力増加速度をやや大きくしたときには海氷はあたかも弾性体に力を加えた時のように変形・破壊し，ガラスその他の物質と似た傾向を示したことは興味深い。同様な測定をいろいろの温度において行ないたいと思つている。

終りに臨み，試料の採取及び実験に御協力いただいた低温科学研究所海洋部門の諸兄，および紋別市役所，紋別市漁業協同組合，北海道開発局紋別港湾修築事務所に厚くお礼申し上げます。測定資料の整理にあたつては，低温科学研究所雪氷研究グループの諸兄，特に吉田順五教授には有益な御助言をいただいた。あわせて感謝の意を表します。

文　献

1) Butkovich, T. R. 1956 Strength studies of sea ice. SIPRE. Res. Rep. 20.

2) 大浦浩文・木下誠一 1956 凍土・海氷・池氷の曲げ強度及び圧縮強度の測定について．低温科学，物理篇，***15***，137–148.

3) Assur, A. 1958 Composition of sea ice and its tensile strength. "Arctic Sea Ice" Publication ***598***, NAS–NRC., U.S.A. 106–138.

4) 田畑忠司・小野延雄 1958 海氷の力学的性質の研究 I. 海氷の静的粘弾性について．低温科学，物理篇，***17***，135–146.

5) Jellinek, H. H. G. 1957 Tensile strength properties of ice adhering to stainless steel. SIPRE. Res. Rep. ***23***.

6) 田畑忠司 1958 海氷の力学的性質の研究 II. 振動法による弾性率の測定．低温科学，物理篇，***17***，147–166.

田畑忠司 1959 海氷の力学的性質の研究 III. 振動法による弾性率の測定 (2)．低温科学，物理篇，***18***，115–130.

7) Anderson, D. L. and Weeks, W. F. 1958 A theoretical analysis of sea ice strength. Trans. Amer. Geophys. Uni., ***39***, No. 4, 632–644.

Résumé

The flexural strength of small beams of sea ice was measured using the flexural strength meter shown in Fig. 1. In this meter, the span of beam is 24 cm. Supporting ends of beam A & B are moved vertically at constant speed by an electric motor; the speed can be regulated from 1×10^{-4} to 2×10^{-1} cm/sec by means of several gear wheels. The force applied to the beam is known from proving ring P. Strain gauge R is attached to the ring and the change of applied force with the lapse of time was recorded on the oscillograph.

Several blocks of sea ice were removed from the "young sea ice" formed on the Okhotsk Sea coast of Hokkaido and then the small beams were sawed out by its wide plane horizontal. The dimensions of a beam are 30～40 cm in length, about 5 cm in width and about 2 cm in thickness. The beams which were sawed out from the position of equal distance to the surface of the sea ice sheet were collected as one group. Such a group contains 20～30 beams; eleven (A～K) groups were tested. The beam is placed in the flexural strength meter so that the loading is normal to the ice sheet.

At a given constant speed of A & B, the beam is moved upward until it is broken. The force exerted on the beam is recorded on the oscillograph. After 3～8 beams were tested at a certain speed, the speed was changed and again 3～8 beams were broken. By changing the rising speed of the beam, loading rate and therefore the rate of stress increase are also changed. All beams were kept in the thermostat at temperature of −3°C during 2～6 hours before the test was made. The flexural strength meter was also placed in another thermostat of −3°C.

The maximum stress in the beam is represented as equation (1). The flexural strength σ_c and the force applied at the moment of breakage F_c are also estimated by this equation, where b is the width, h is the thickness and l is the length of span of beam. The deflection δ at points C and D are represented as equation (2). In this measurement, the deflection δ is the difference between the amount of rising of AB, δ', and the contraction of ring P, aF. Therefore, equations (4) and (5) are easily obtained, where a is a constant which is equal to 2.91×10^{-3} cm/kg.

Prior to the measurement of the flexural strength, Young's modulus E was measured by the method of lateral vibration. Relation between E and density ρ at −3°C is shown in Fig. 2. Young's modulus decreases linearly with decreasing density. This relation is recognized as similar to that the author reported in a previous paper.

The change of applied force F with the lapse of time during the test of flexural strength is recorded in the oscillograph. Some examples of oscillogram are shown in Fig. 3. In the upper three examples, $\dot{F}$ is decreasing with the lapse of time. In the lower one, $\dot{F}$ has a constant value of 6.3 kg/sec, and the beam seems to be deflected and broken like an elastic substance. Therefore, using equation (5), one can obtain the flexural Young's modulus E^*. The pencil rubbings of lower surface of the beams after they have broken are shown in Fig. 4. The parallel black lines are the edge of ice plates.

The failure always happened along the brine cells, that is parallel to the ice plates as Anderson has stated before.

The flexural strength σ_c obtained in various rates of stress increas $\dot{\sigma}$ is shown in Fig. 5 (a). Fig. 5 (b) shows the percentage of the beams which were broken like an elastic substance at various $\dot{\sigma}$. When $\dot{\sigma}$ lies between 2～5 kg/cm²/sec, the strength σ_c shows a minimum value and with decreasing $\dot{\sigma}$ the beams break plastically and strength increases. When $\dot{\sigma}$ becomes larger than 4～6 kg/cm²/sec, all beams break like an elastic substance and the strength also increases.

When $\dot{\sigma}$ is less than 5 kg/cm²/sec (group A～H), the flexural Young's modulus E^* is almost a constant value. In the range of $\dot{\sigma}$ where it is larger than 3 kg/cm²/sec, (I, J, K), E^* increases with the increase of $\dot{\sigma}$ (Fig. 8) and approaching to the Young's modulus E obtained by the lateral vibration method. The relation between strain rate $\dot{\varepsilon}$ and $\dot{\sigma}$ is seen in Fig. 9 and equation 7. The relations between the time T required for the break down of the beam and $\dot{\sigma}$ is seen in Fig. 10 and equation 8. The maximum strain ε when the beam has broken is represented as equation 9 and it decreases with the increase of $\dot{\sigma}$ because $b+n$ is always larger than unity.

As is the case of the usual substances, also in the sea ice, flexural strength σ_c increases with the increase of E^*. It is seen in equation 10 and Fig. 11. In equation 10, p and q for the groups A～H, I, J and K are 6.9, 0; 3.2, 0.55; 5.22, 0.37; 11.1, 0.023, respectively.

Flexural Young's modulus E^* is also a function of density (Fig. 12). The vertical distribution of σ_c, E, E^*, density and chlorinity are obtained as shown in Fig. 13.

Pam:551.326.7:
(52)
TAB

54648

TABATA, Tadashi
AUTHOR

Studies on mechanical properties of sea ice. V. Measurement of flexural strength.
TITLE

DATE LOANED | BORROWER'S NAME | DATE DUE

Due

54648

BOREAL INSTITUTE FOR NORTHERN STUDIES, LIBRARY
THE UNIVERSITY OF ALBERTA
EDMONTON, ALBERTA T6G 2E9
CANADA

University of Alberta Library
0 1620 0332 5998